Regular paper

Journal of the KIECS. pp. 597-604, vol. 11, no. 6, Jun. 30 2016, t. 74, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2016.11.6.597

핸드피스용 BLDC 모터 속도 제어시스템의 설계

곽성우* · 양정민**

Design of Brushless DC Motor Speed Control System for Handpieces

Seong-Woo Kwak* · Jung-Min Yang**

요 약

본 논문에서는 미용 목적의 핸드피스에 사용가능한 BLDC 모터의 속도 제어 시스템을 구현한다. 저비용 개발을 위해 모터 내부의 홀 센서 값을 속도 제어에 이용하였다. 모터 전원 회로와 드라이버 회로는 가정용 220V 전원을 입력으로 사용하도록 설계하였으며 별도의 다른 전원은 필요로 하지 않는다. 핸드피스 작업 시 발생하는 부하 변동에 따른 급속한 속도 증가를 방지하기 위해 별도의 과속 방지 제어기를 탑재하였다. 개발된 제어 시스템은 5,000~30,000 RPM 구간에서 운용 가능하다. 본 연구에서 개발된 핸드피스 모듈에서 부하 변동이 있음에도 불구하고 모터의 속도가 일정하게 유지됨을 실험으로 입증한다.

ABSTRACT

In this paper, we develope a speed control system of a BLDC motor for handpieces used in beauty applications. To reduce implementation cost, the control system utilizes hall sensors embedded in BLDC motors for speed estimation. The developed power module of a motor uses only 220V home voltage, so that the control system does not need any other power sources. An over-speed limit controller is also developed to slow down a motor when the speed goes up rapidly for a moment upon some heavy load is removed. The control system is designed to operate a handpiece with speed in the range of 5,000~30,000 RPM. Experiment results show the validity of the developed system, which maintains the speed of a motor steady even though a load is varied.

키워드

BLDC Motor, Speed Control, Handpiece, Driver Circuit
BLDC 모터, 속도 제어, 핸드피스, 드라이버 회로

Ⅰ. 서 론

고속 모터(motor) 시스템은 여러 산업 현장이나 공학적 목적용으로 다양하게 사용되고 있다. 장시간 사용하는 작업의 경우 모터의 높은 내구성이 요구된다. 이에 부합하는 BLDC(: Brushless Direct Current) 모터는 우수한 내구성과 제어 성능, 높은 토크, 빠른 응답성을 가지고 있다. 최근 BLDC 모터의 가격이 저렴해지면서 자동차, 산업 자동화 등의 다양한 분야에 적용되고 있다[1]. BLDC 모터는 DC 모터와 다르게 내부에 기계적인 브러시 장치를 가지고 있지 않는 모터를 말한다. 브러시가 없으므로 DC 모터와 비교하여

* 계명대학교 전자공학과(ksw@kmu.ac.kr)
** 교신저자 : 경북대학교 전자공학부
• 접 수 일 : 2016. 04. 29
• 수정완료일 : 2016. 06. 13
• 게재확정일 : 2016. 06. 24
• Received : Apr. 29, 2016, Revised : Jun. 13, 2016, Accepted : Jun. 24, 2016
• Corresponding Author : Jung-Min Yang
School of Electronics Engineering, KyungPook National University,
Email : jmyang@ee.knu.ac.kr

전기적, 기계적 노이즈가 적다[2-3]. 3상 BLDC 모터의 구조는 크게 회전자(rotor), 고정자(stator), 홀 센서(hall sensor)로 구성된다[2]. 모터에 내장된 홀 센서를 통해 회전자의 위치 정보가 제공되므로 비교적 적은 비용으로 위치제어 및 속도제어가 가능하다.

본 논문에서는 네일아트(neil art) 등과 같은 미용 목적으로 사용되는 핸드피스(handpiece)에 탑재되는 BLDC 모터의 속도 제어시스템을 개발한다. 미용 목적의 핸드피스는 5,000~30,000 RPM의 고속 회전이 가능해야 하고 부하 변동에 따른 회전수의 증감이 적도록 설계되어야 한다. 또한 상업성을 위해 저가로 제어 시스템을 구현할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 핸드피스용 BLDC 모터를 위한 전원부와 드라이버(driver) 회로를 설계하고 위와 같은 요구사항을 만족하는 속도 제어 시스템을 개발한다.

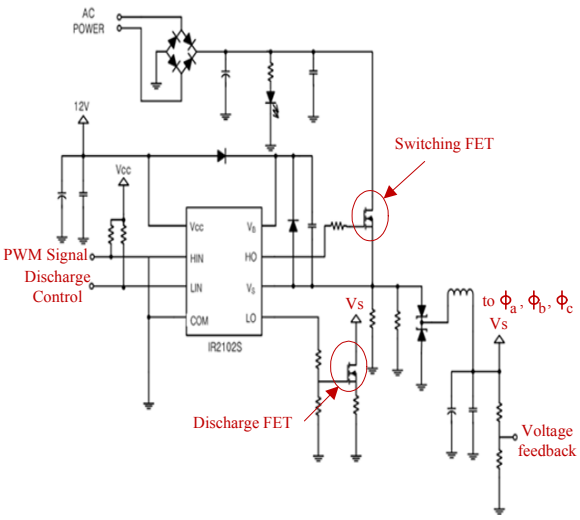

그림 1. BLDC 모터 전원 공급 회로
Fig. 1 Power module for the BLDC motor

II. BLDC 모터 전원 및 드라이버 회로 설계

2.1 모터 전원 공급 모듈

본 연구에서는 가정용 220V 교류 전원을 입력받아서 정류기를 거쳐 직류 전압으로 바꾼 다음 모터의 구동 전원으로 사용한다. 정류기를 통하여 만들어진 직류 전압은 스위칭 FET(: Field Effect Transistor)를 이용하여 전압을 원하는 레벨(level)로 조절한다. 스위칭 트랜지스터가 ON되는 듀티비(duty ratio)를 높이면 전압 레벨을 높일 수 있고, 듀티비를 낮추면 전압 레벨을 낮출 수 있다. 본 연구에서는 모터의 토크를 제어하기 위해 각 상에 인가되는 전압을 조절하여 코일에 흐르는 전류를 제어하였다. 그림 1은 본 연구에서 개발한 BLDC 모터의 전원 공급 회로이다. 스위칭 FET의 게이트 구동 칩(IR2102)과 PWM 신호를 이용하여 트랜지스터의 ON/OFF 듀티비를 조절하였다. 스위칭 FET에 의해 만들어진 직류 전압 V_S는 모터의 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c 상 전압으로 공급된다. 모터로 공급되는 직류 전압 V_S는 저항을 통하여 센싱(sensing)되고 제어기로 피드백(feedback)되어 PWM 신호 듀티비를 조절하는 데 이용된다. 모터 속도를 빠르게 감속시키기 위해서는 직류 전압 레벨을 신속히 감소시켜야 한다. 이를 위해 별도의 Discharge FET를 사용하여 커패시터(capacitor)에 충전된 전압을 방전시킴으로서 직류 전압 레벨 V_S를 빠르게 낮추도록 하였다.

2.2 모터 드라이버 모듈

3상 BLDC 모터 드라이버 회로는 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c 상에 해당하는 코일에 전류를 공급하는 회로이다. BLDC 모터를 구동하기 위해서는 모터 회전자의 위치에 따라 모터의 각 상에 적절한 전류를 흘려주어야 한다. 회전자의 위치는 모터에 내장되어 있는 홀(hall) 센서 값을 통해 알 수 있다. 홀 센서가 내장된 BLDC 모터는 3개의 센서 값을 제공한다. 3개의 센서 값을 통해 회전자의 위치를 60° 간격으로 알 수 있다. 홀 센서로부터 계산된 회전자의 위치를 시간으로 나누면 회전자의 속도가 얻어진다. 이것은 엔코더(encoder)와 같은 고가의 외부 센서 없이 속도를 계산할 수 있다는 의미이므로 저비용으로 모터 제어 시스템을 개발할 수 있게 한다. 모터의 각 상에 전류를 공급하는 드라이버 회로는 그림 2와 같다. 회전자가 지속적으로 회전하도록 하기 위해서는 각 상의 입력 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c를 전원 공급 회로에서 만들어진 직류 전압 V_S 또는 접지(GND)로 연결한다. 그림 2에 나타낸 6개의 FET는 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c를 V_S로 연결하거나 접지로 연결하기 위해 사용되었다. FET 구동 칩 IR2102은 2개의 FET를 동시에 작동시킨다. FET 한 개는 전원 전압 V_S에 연결되고 나머지 FET는 접지에 연결된다. 각 FET를 ON/OFF하는 6개의 제어 신호(E^i_H, E^i_L i=a,b,c)는 홀 센서 값을 이용하여 발생시킨다. E^i_H는 구동 칩 IR2102에 연결된 위

쪽 FET를 ON/OFF시키는 제어 신호이고, E^i_L는 아래쪽 FET를 ON/OFF시키는 신호이다. 6개의 FET를 주어진 순서에 따라 순차적으로 ON/OFF 시키면 모터의 회전자는 지속적으로 회전한다. 식 (1)은 E^i_H와 E^i_L에 따라 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c 상에 공급되는 전압 값을 보여준다.

$$\phi_i = \begin{cases} V_S & \text{if } E^i_H = ON \\ GND & \text{if } E^i_L = ON \\ NC & \text{if } E^i_H = OFF, E^i_L = OFF \end{cases}, \quad i = a,b,c \qquad (1)$$

여기서 NC는 ϕ_i가 어떤 신호와도 연결되지 않은 개방(open) 상태를 의미한다. E^i_H, E^i_L는 동시에 ON되지 않도록 제어하여야 한다.

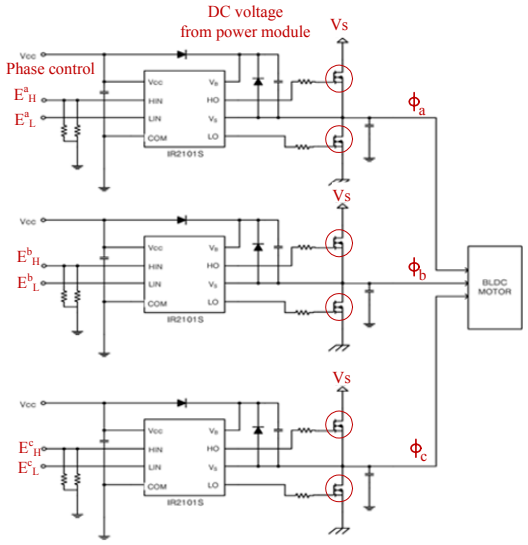

그림 2. BLDC 모터 드라이버 회로
Fig. 2 Driver module for the BLDC motor

III. BLDC 모터 속도 제어기

3.1 BLDC 모터 모델링

3상 BLDC 모터에서 영구자석과 스테인리스강으로 된 영구자석 고정 슬리브(sleeve)는 높은 저항성을 가지므로 회전자에 유기되는 전류는 무시될 수 있다. 또한 제동 권선은 없는 것으로 가정하면 고정자 3상 권선의 상변수 회로 방정식은 다음과 같다[4].

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \qquad (2)$$

여기서 v_a, v_b, v_c는 3상 모터의 각 권선에서 중점까지의 전압이며, R은 권선 저항을 나타낸다. L_a, L_b, L_c는 각 권선의 자기 인덕턴스(self inductance)를 나타내며, L_{ba}, L_{ca}, L_{cb}는 권선간 상호 인덕턴스(mutual inductance)이다. e_a, e_b, e_c는 회전자의 회전에 의한 역기전력(back electromotive force)이며 i_a, i_b, i_c는 각 권선에 흐르는 전류이다. 표면 부착형 영구자석 모터인 경우 회전자 위치에 따른 3상 고정자 권선 인덕턴스의 변화가 없으므로 각 상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 동일하다. 이를 각각 L_s과 M으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_a &= L_b = L_c = L_s \\ L_{ba} &= L_{ca} = L_{cb} = M \end{aligned} \qquad (3)$$

식 (2)에 식 (3)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \qquad (4)$$

모터의 토크 T_e는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = \frac{1}{\omega_m}(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \qquad (5)$$

여기서 ω_m은 회전자의 기계적인 속도이다. 위의 식을 운동 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_e = \tau_d + J\frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \qquad (6)$$

여기서, τ_d는 외란 토크, J는 관성 계수, 그리고 B는 마찰계수이다.

3.2 BLDC 모터 속도 제어기

그림 3은 BLDC 모터의 속도를 제어하기 위해 본 연구에서 개발한 제어기의 블록도이다. 제어 알고리듬은

마이크로컨트롤러(micro-controller) 내에서 구현하였다. BLDC 전동기의 속도제어를 위한 기준 입력은 외부에서 설정된다. 회전자의 위치정보를 미분하여 구한 모터의 속도와 기준 속도간의 오차 e(k)를 계산하여 제어기에 입력한다. 제어 메커니즘으로 아래와 같은 디지털 PI 제어 형태를 사용하였다[5].

$$\Delta u(k) = T \cdot Ki \cdot e(k) + Kp \cdot \Delta e(k) \quad (7)$$

여기서 u(k)는 V_s 전압 값을 바꾸는 PWM의 듀티비 입력이며, T는 제어기의 샘플링 시간, K_p, K_i는 PI 제어기의 위치 및 적분 이득(gain)을 각각 나타낸다. 전압제어기(voltage controller)는 저항 센서를 통해 피드백되는 V_s 전압과 PI 제어기로부터 전달되는 $\Delta u(k)$ 값, 그리고 외부의 속도 설정 값을 기반으로 최종적으로 PWM의 듀티비 변동량을 결정한다.

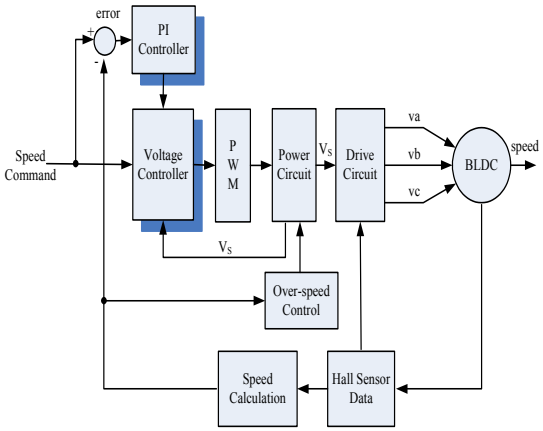

그림 3. BLDC 모터의 속도 제어기 블록도
Fig. 3 block diagram for the speed controller of the BLDC motor

모터 속도와 기준 속도간의 오차가 전동기의 물리적인 가속 범위를 벗어나면 가속도는 최대치로 설정한다. 또한 갑작스런 부하 변동으로 인하여 과속이 발생하면 핸드피스 끝에 장착되어 회전하는 미용 도구는 인간에게 위험이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 과속을 방지하는 별도의 과속 방지 제어기를 부착하였다. 과속 방지 제어기의 원리는 다음과 같다. 모터의 속도가 외부 설정 값보다 일정 수준 이상이면 그림 1의 Discharge FET를 작동시켜 커패시터에 충전된 전하를 방전시킴으로써 V_s 전압을 빠르게 감소시킨다. 이때 V_s 전압을 변화시키는 PWM 신호는 "0"으로 유지하여 더 이상 전기에너지가 공급되지 못하게 차단한다. 모터에 공급되는 V_s 전압이 급격히 낮아지면 회전자를 회전시키는 전자기력이 줄어들어 속도가 빠르게 감소한다.

IV. 시스템 구현 및 실험 결과

4.1 시스템 구현

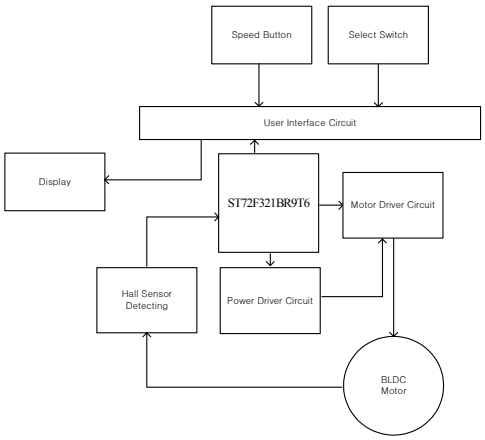

그림 4. 핸드피스용 BLDC 모터 제어 시스템
Fig. 4 BLDC motor control system for handpieces

본 논문에서 설계한 제어기의 효용성을 확인하기 위해 8비트 마이크로컨트롤러(ST72F321BR9T6)를 이용하여 모터의 속도 제어 시스템을 구현하였다. 그림 4는 본 연구에서 개발한 핸드피스용 BLDC 모터 제어 시스템의 블록도이다. 사용자 인터페이스 회로를 통해 외부 사용자의 속도 설정 값을 입력으로 받고, 디스플레이 모듈을 통해 모터의 현재 속도를 표시한다. BLDC 모터에 내장된 홀 센서 데이터를 수집하여 회전자의 속도와 위치를 계산하여 모터 드라이버 모듈을 구동한다. 또한 그림 3의 제어 알고리듬을 실행하여 모터의 속도를 제어한다. 사용자 인터페이스를 통한 입출력, 홀 센서 데이터 처리, 제어 알고리듬 수행 등의 모든 작업은 마이크로컨트롤러에서 수행된다.

그림 5는 마이크로컨트롤러에서 수행되는 소프트웨어의 흐름도이다. 제어 소프트웨어는 메인 프로그램과 인

터럽트(interrupt)에 의해 수행되는 보조 프로그램 A, B 등 크게 세 가지 모듈로 구성된다. 메인 프로그램은 시스템을 초기화하고 사용자 설정 값을 입력받는다. 외부 속도 설정 값은 ADC(: Analog to Digital Converter)를 통해 읽어 들인다. 또한 홀 센서 데이터로부터 계산된 모터 실제 속도를 출력 화면에 표시한다.

보조 프로그램 A, B는 인터럽트 서비스 루틴 형태로 수행된다. 보조 프로그램 A는 일정한 시간마다 발생되는 타이머 인터럽트를 기반으로 작동한다. 매 인터럽트마다 메인 프로그램에서 취득한 속도 설정 값과 보조 프로그램 B에서 계산된 모터 속도 값을 가져온다. 이들 데이터를 바탕으로 그림 3의 PI 제어기, 전압 제어기, 과속방지 제어 알고리듬을 수행한다.

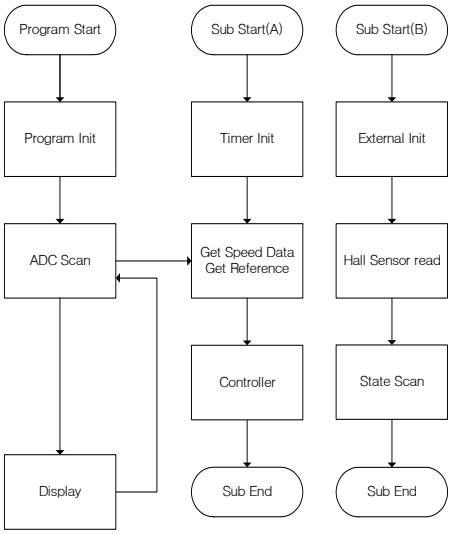

그림 5. 핸드피스용 BLDC 모터 제어 시스템의 소프트웨어 흐름도

Fig. 5 Software flow diagram of the BLDC motor control system for handpieces

보조 프로그램 B는 홀 센서 값에 의해 만들어지는 외부 인터럽트에 의해 수행된다. 3개의 홀 센서 데이터 값 중 어느 하나라도 변화가 있으면 외부 인터럽트가 발생하도록 하드웨어 회로를 구성하였다. 보조 프로그램 B는 매 외부 인터럽트마다 BLDC 모터의 홀 센서값을 받아들여 회전자의 위치(상태)를 파악한다. 회전자가 계속 회전하도록 모터 드라이버 모듈의 6개의 FET를 작동시키는 제어 신호(E^i_H, E^i_L, i=a,b,c)를 드라이버 모듈로 내보낸다. 또한 홀 센서 값과 타이머 값을 기반으로 모터의 현재 속도를 계산한다.

그림 5는 본 연구에서 개발된 BLDC 모터 제어시스템의 하드웨어이다. 전원 공급 모듈, 모터 드라이버 모듈, 그리고 마이크로컨트롤러 모듈로 구성된다. 핸드피스용으로 사용하기 위해 제어 시스템은 공간을 최소화하도록 구성하였다. 사용자 디스플레이, 버튼 등이 포함된 사용자 인터페이스 하드웨어는 별도의 PCB에 구성하였다.

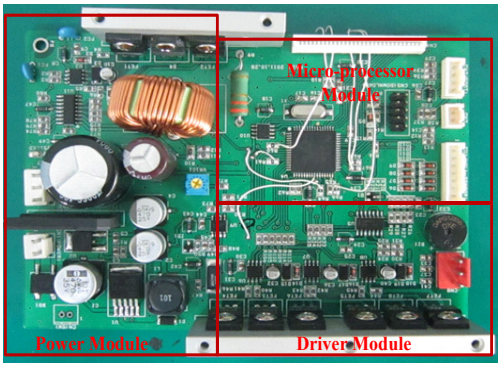

그림 5. 핸드피스용 BLDC 모터 제어 시스템 하드웨어

Fig. 5 Hardware of the BLDC motor control system for handpieces

4.2 실험 결과

그림 5는 부하를 가하지 않고 외부 속도 설정 값을 5,000 RPM로 했을 때 BLDC 모터의 홀 센서 신호(w상)와 모터 a상에서의 전류를 측정한 것이다. 홀 센서의 주기가 실제 모터 속도와 같으므로 속도는 5,042 RPM (=1/11.9ms×60)으로 설정 값과 매우 근사하며, 이정도 오차는 미용 목적의 핸드피스로 사용하기에는 무리가 없다. 해당 상에 흐르는 전류의 최대값은 350mA이다.

그림 6은 속도 설정 값을 25,000 RPM으로 올렸을 때의 측정 결과이다. 실제 모터 속도는 25,210 RPM이고, 속도 증가에 따라 최대 전류값도 1A로 증가되었다. 그림 7은 속도 설정 값을 25,000 RPM로 하고 모터에 외부 부하를 가했을 때 결과이다. 외부 부하에 따라 전류 최대값이 3A로 증가하였다.

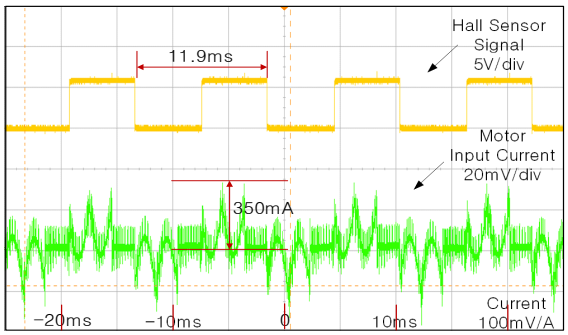

그림 6. 무부하시 5,000RPM에서 홀 센서 신호(w상)와 모터 a상의 전류파형

Fig. 6 Hall Sensor Signal(w phase) and Current of A Phase at 5,000 RPM with no Load

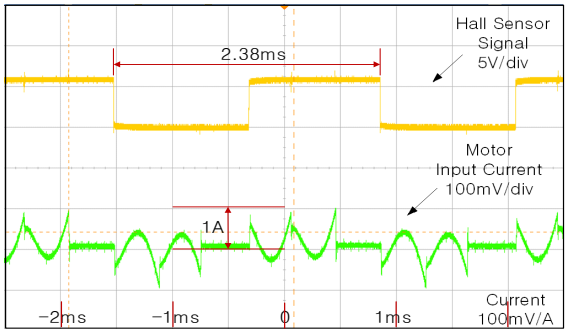

그림 7. 무부하시 25,000 RPM에서 홀 센서 신호(w상)와 모터 a상의 전류파형

Fig. 7 Hall Sensor Signal(w phase) and Current of A Phase at 25,000 RPM with no Load

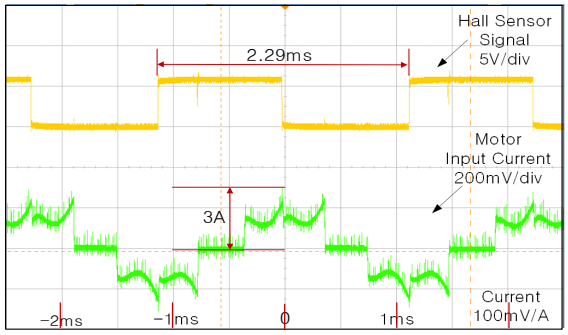

그림 8. 부하가 있을 때 25,000 RPM에서 홀 센서 신호(w상)와 모터 a상의 전류파형

Fig. 8 Hall Sensor Signal(w phase) and Current of A Phase at 25,000 RPM with Some Load

V. 결론

본 논문에서는 핸드피스용 BLDC 모터의 속도 제어 시스템을 구현하였다. 저비용 개발을 위해 외부 센서 대신 모터 내부의 홀 센서 값을 이용하여 속도 제어에 이용하였다. 속도 정밀도는 높지 않지만 핸드피스용으로 사용되기에는 무리가 없다. 모터의 속도가 부하 변동이 있음에도 불구하고 일정하게 유지됨을 실험으로 확인하였다. 본 논문에서 제안된 속도 제어 시스템은 별도의 외부 전원을 필요하지 않고 가정용 220V 전원으로 구동가능하다. 따라서 저비용으로 구현할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF- 2015R1D1A1A01056764). 이 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015H1C1A1035914).

References

[1] S. Youn and J. Lee, “Speed control of permanent magnet brushless DC motor using variable gain PI controller,” *The Trans. of the Korea Institute of Electrical Engineers*, vol. 62, no. 9, 2013, pp. 1234-1239.

[2] S. Kwak, H. Kim, and J. Yang, “Design and implementation of oil pump control systems driven by a brushless DC electric motor,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 1, 2013, pp. 83-90.

[3] Y. Jeon and M. Cho, “A speed control of BLDC motor using adaptive back stepping technique,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vo1. 9, no. 8, 2014, pp. 899-906.

[4] S. Lee, Y. Jeon, and W. Cho, “Position

and speed control of the BLDC motor based on the back-stepping(gain design)," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 10, no. 3, 2015, pp. 403-412.

[5] S. Kim, B. Han, and H. Yang, "The PSO-PID speed controller design for the BLDC motor," *The Trans. of the Korea Institute of Electrical Engineers*, vo1. 60, no. 9, 2011, pp. 1777-1782.

저자 소개

곽성우(Seong-Woo Kwak)

1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학사)
1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학석사)
2000년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학박사)
2000년～2002년 인공위성연구센터 선임연구원
2003년～현재 계명대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 위성 탑재 컴퓨터, 실시간 시스템, 비동기 시스템 설계, 내고장성 시스템 설계

양정민(Jung-Min Yang)

1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학사)
1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학석사)
1999년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학박사)
1999년～2001년 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어 기술연구소 선임연구원
2001년～2013년 대구가톨릭대학교 전자공학과 교수
2013년～현재 경북대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 비동기 순차 머신 제어, 실시간 시스템, 화재 시뮬레이션